



## Modélisation MHD 3D d'une torche plasma triphasée

Christophe Rehmet, Vandad-Julien Rohani, François Cauneau, Laurent Fulcheri

### ► To cite this version:

Christophe Rehmet, Vandad-Julien Rohani, François Cauneau, Laurent Fulcheri. Modélisation MHD 3D d'une torche plasma triphasée. CAE XI - Colloque sur les Arcs Electriques, Mar 2013, Toulouse, France. 4 p. hal-00804640

**HAL Id: hal-00804640**

**<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00804640>**

Submitted on 28 Mar 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Modélisation MHD 3D d'une torche plasma triphasée.**

Christophe Rehmet, Vandad Rohani, François Cauneau et Laurent Fulcheri

*MINES ParisTech, Centre PERSEE  
Procédés, Energies Renouvelables et Systèmes Énergétiques*

*Rue Claude Daunesse, CS 10207, 06904 Sophia Antipolis □ France*

*e-mail : christophe.rehmet@mines-paristech.fr*

**Résumé** - Alors que de nombreuses études sont consacrées à la modélisation Magnéto-Hydro-Dynamique (MHD) des arcs en courant continu, peu d'études sont dédiées aux arcs des torches plasma triphasées. Cette étude présente les résultats de la modélisation MHD 3D instationnaire d'une torche plasma triphasée avec des électrodes en graphite. Les équations de la MHD sont résolues en utilisant le logiciel de mécanique des fluides Code\_Saturne® à L'Equilibre Thermodynamique Local (ETL). Cette modélisation a été appliquée avec succès et elle simule automatiquement l'allumage et l'extinction des arcs.

## **Introduction**

Les torches plasma d'arc sont utilisées pour de nombreuses applications industrielles. Cependant, la plupart de celles-ci sont des torches plasma à courant continu. Depuis environ 15 ans, une technologie de torche à plasma triphasée, avec des électrodes consommables en graphite non refroidies, est en cours de développement au centre PERSEE MINES-ParisTech. Cette technologie diffère sensiblement des technologies classiques, à courant continu, et vise principalement à limiter les coûts d'équipement et d'exploitation en améliorant l'efficacité et la fiabilité de ces dispositifs.

## **I La torche plasma triphasée et son maillage**

La technologie plasma triphasée est basée sur la génération d'arcs en rotation créés à l'extrémité de trois électrodes en graphite connectées à une alimentation électrique triphasée. Selon les caractéristiques de l'alimentation, la fréquence peut varier entre, 50 Hz et plusieurs kHz. Récemment, une nouvelle configuration de torche triphasée ayant trois électrodes radiales, situées dans un plan perpendiculaire à l'axe du réacteur, a été développée. Il s'agit ici de modéliser le comportement des arcs rotatifs dans cette configuration de torche.

La grille de calcul de la torche plasma triphasée a été créée en utilisant le logiciel Salome6©. Le domaine de calcul correspond à la zone fluide, fonctionnelle à l'évolution des arcs. Un maillage, hexaédrique non uniforme d'environ 888 840 nœuds, a été utilisé pour l'intégralité du domaine de calcul et il est affiné au voisinage des électrodes. Toutefois, en raison de problèmes géométriques, trois zones externes

du domaine ont été exclues de la grille de calcul. Ces zones ne représentent que 2% du volume total de la zone fluide et elles sont situées loin de la zone fonctionnelle.

## **II Description du modèle**

### **Hypothèses**

Les arcs étant générés dans l'azote, les données sur les propriétés de transport ont été prises à partir de la ref [1]. Les hypothèses couramment utilisées et considérées ici pour modéliser le système triphasé en 3D sont :

- 1) Plasma considéré comme un mono-fluide continu (azote) à l'équilibre thermodynamique local (ETL).
- 2) Gaz incompressible.
- 3) Flux de gaz laminaire et dépendant du temps.
- 4) Effets inductifs négligés.
- 5) Effets gravitationnels et rayonnement pas pris en compte.

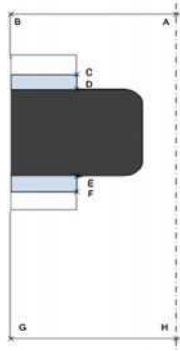
Afin de limiter le temps de calcul et en raison de la difficulté de modéliser le système triphasé, l'hypothèse ETL a été considérée dans cette étude. Les effets inductifs sont ici négligés car la fréquence de l'alimentation électrique (680 Hz) est considérablement inférieure à la fréquence des ions ou à celle des radio-fréquences utilisées dans les torches plasma à induction (ICP). Les pertes par rayonnement n'ont pas été prises en compte dans le but de réduire le temps de calcul. Des simulations ont néanmoins été réalisées, en utilisant le coefficient d'émission de l'air [2], montrant que la diminution de la température est de 1500 K à 18 000 K au centre de l'arc et la réduction de la conductivité électrique est compensée par l'augmentation du champ électrique. Les profils de densité de courant ne sont donc pas sensiblement modifiés et n'affectent pas de manière significative le comportement global des arcs. En ce qui concerne le bilan de puissance dans la zone de post décharge, les pertes par rayonnement sont compensées par l'augmentation de la puissance. Concernant la chute de tension dans la gaine, elle n'est pas prise en compte, car il est difficile d'estimer sa valeur instantanée pour les arcs en courant alternatif. Par conséquent, les résultats donnent la chute de tension uniquement dans la colonne d'arc.

### **Equations**

Compte tenu des hypothèses énumérées ci-dessus, les équations fluides peuvent être écrites sous la forme des équations de conservation usuelles en instationnaire dans lesquelles nous incluons la force de Lorentz et l'effet joule, en supposant l'approximation de la loi d'Ohm sous sa forme simplifiée et la neutralité électrique globale [3].

## Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont détaillées et exposées sur la moitié d'une vue en coupe transversale (Table 1). Concernant les conditions hydrodynamiques, l'injection centrale de gaz plasma est située dans la zone AB. L'entrée annulaire de gaz autour de l'électrode se situe sur les zones CD et EF. Concernant les conditions électromagnétiques, un potentiel électrique sinusoïdal de 680 Hz est imposé sur chaque électrode. Ce potentiel électrique est déphasé de  $2\pi/3$  entre les trois électrodes et est ajusté par le modèle en utilisant une variable nommée  $\phi_r$ , de manière à réguler le courant circulant des arcs.



**Table 1** Boundary conditions applied to one-third of the computing domain, with  $f$ ,  $\tau$  and  $it$  the frequency, the times step and the number of the iteration respectively

		Velocity (m s <sup>-1</sup> )	Temperature (K)	$\phi_r$ (V)	$P$ (Pa)	$A$
AB	Central injection	0.01 à 0.43	300	0	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
BC, FG	Walls	0	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \phi_r}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
CD, EF	Inlets around the electrodes	1.0526	300	$\frac{\partial \phi_r}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	0
DE	Electrodes	0	4,300 on 7 mm else $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\phi_r \sin(2\pi f \tau it - \frac{2k\pi}{3})^a$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
GH	Outflow	$\frac{\partial v}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \phi_r}{\partial n} = 0$	$1.013 \times 10^5$	0

<sup>a</sup> k for the electrode number from 0 to 2

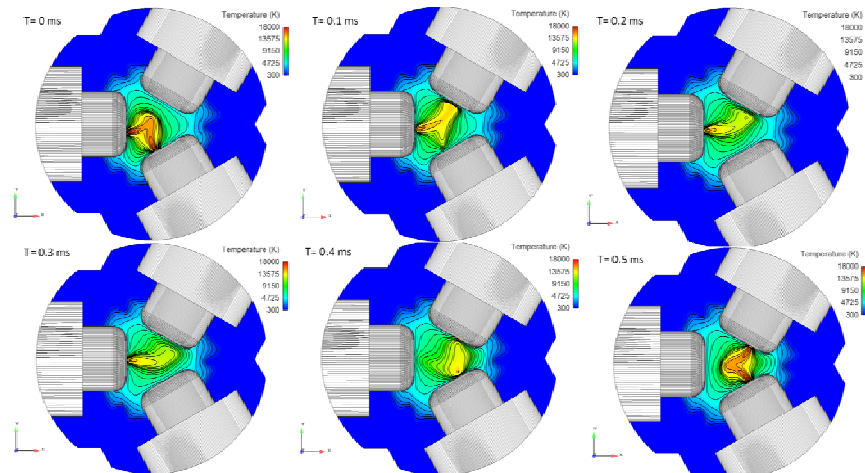
## Insertion du fonctionnement triphasée dans Code Saturne

Le logiciel Code\_Saturne version 2.0 et son module 'arc électrique' associé ont été utilisés. Le pas de temps est de 5 ms, déterminé par une étude paramétrique pour donner un temps de calcul raisonnable. Pour initier les premiers arcs, une zone chaude à 6000 K est insérée entre les trois électrodes et le courant est incrémenté pendant 5 ms, de 5 à 400 A. On impose une valeur constante sur la somme des courants mesurés sur trois plans entre les trois électrodes. Cette méthode donne des résultats similaires aux résultats obtenus expérimentalement et donne plus de degrés de liberté au modèle dans le cas où un arc ne se serait pas amorcé. Cependant, le mouvement des arcs à travers les trois plans induit des erreurs de mesure [3]. Une différence maximale de 10% est observée entre la puissance électrique totale et la puissance dissipée par effet Joule.

## III Résultats

La modélisation MHD a été appliquée avec succès et le modèle simule automatiquement l'allumage, l'extinction et le mouvement entre les trois électrodes des arcs (Figure 2). Les résultats montrent que le débit massique émanant des jets aux électrodes contrôle le mouvement de l'arc et la forme de l'écoulement du plasma en post-décharge. Ce flux de masse est dirigé le long de la normale à l'extrémité de l'électrode et dévie une partie du gaz plasma vers les parois. De plus, la chaleur transmise par ces jets sur l'électrode inactive aide à initier de nouveaux arcs. L'augmentation du courant accroît la vitesse des jets aux électrodes et stabilise les arcs dans l'espace inter-électrodes. D'autre part, la température imposée sur l'extrémité des

électrodes a également une influence significative sur le mouvement de l'arc et la forme du plasma de post décharge. Au niveau global, les arcs générés entre les trois électrodes en graphite induisent une chaleur spécifique et un transfert de masse qui ont tendance à homogénéiser la température de l'écoulement plasma.



**Figure 1** Comportement de l'arc représenté par le champ de température dans une section sur l'axe des électrodes [3].

## Conclusion

Un modèle numérique MHD simulant le comportement des arcs dans la torche plasma triphasée a été développé et testé. À notre connaissance, aucun autre modèle MHD d'arcs non transférés dans une torche triphasée n'a été mis au point ou publié. Ce modèle simule automatiquement l'allumage, l'extinction et le mouvement des arcs entre les trois électrodes. Les résultats expérimentaux obtenus avec une caméra rapide, présentés dans un autre article, montrent que le comportement de l'arc est similaire aux résultats obtenus ici par modélisation. Des informations difficilement accessibles expérimentalement et importantes, ont ainsi été obtenues par modélisation. En particulier, cette étude a mis en évidence l'influence de la vitesse du gaz et du courant sur les caractéristiques de l'arc en termes de vitesse, température, potentiel électrique, mouvement et position de l'arc. Ce travail permet donc d'avoir une meilleure compréhension du comportement des arcs dans une torche plasma triphasée.

## Références

- [1] Boulos M., Fauchais P., Pfender E., "Thermal Plasmas Fundamentals and applications". Springer. (1994).
- [2] Naghizadeh-Kashani Y., Cressault Y., Gleizes A. "Net emission coefficient of air thermal plasmas" J. Phys. D, Appl. Phys. 35:2925–34 (2002).
- [3] Rehmet C., Rohani V., Cauneau F., Fulcheri L. "3D unsteady state MHD modeling of a 3-Phase AC hot graphite electrodes plasma torch." Plasma Chem Plasma Process, DOI 10.1007/s11090-013-9438-8. (2013)